



Тематический выпуск

СОДЕРЖАНИЕ

К читателям (<i>обращение главного редактора</i>).....	4
Статьи	
<i>Дивинский Б.В., Косьян Р.Д., Куклев С.Б.</i> Параметры ветрового волнения на защищенных акваториях	5
<i>Кантарджи И.Г.</i> Воздействия на водную среду при строительстве морских портов и сооружений на шельфе	17
<i>Пелиновский Е.Н., Шургалина Е.Г.</i> Аномальное усиление волны вблизи вертикальной преграды	29
<i>Камынин Е.Ю., Максимов В.В., Нуднер И.С., Семёнов К.К., Хакимзянов Г.С.</i> Исследование взаимодействия уединенной волны с частично погруженным сооружением	39
<i>Диденкулова И.И., Сергеева А.В., Пелиновский Е.Н., Гурбатов С.Н.</i> Статистические оценки характеристик наката длинных волн на берег	55
<i>Хабахнашева Т.И., Коробкин А.А.</i> Импульсивное воздействие обрушающихся волн на упругие береговые сооружения	64
<i>Леонтьев И.О.</i> Динамика профиля песчаного берега на различных масштабах времени	78
<i>Соомере Т., Зайцева-Пярнасте И., Рямяет А., Куренной Д.</i> О пространственно-временной изменчивости полей волнения Финского залива	90
<i>Гагошидзе Ш.Н.</i> К оценке воздействия вдольбереговых волн на береговые откосы открытых морских и речных каналов	102
Рецензия на книгу	
Холодова С.Е., Перегудин С.И. Моделирование и анализ течений и волн в жидких и сыпучих средах	114
Конференции	
Информация о предстоящих (международных) конференциях по гидрофизике в 2011 г.	115
Поздравляем!	117
Хроника	120
Тематический указатель 2008–2010 гг.	122
Авторский указатель за 2008–2010 гг.	126
Правила представления материалов в редакцию.....	127

CONTENTS

Articles

- Divinsky B.V., Kosyan R.D., Kuklev S.B.* Parameters of Wind Waves on the Protected Water Areas 5

In the paper some aspects of mathematical modeling of wave and hydrodynamic regime at protected water areas are considered, examples of the dangerous hydrodynamic phenomena research (broken water, harbor seiche, resonant characteristics of harbor) are given. Recommendations of various wave and hydrodynamic models applicability for the decision of assigned tasks are given.

Key words: mathematical simulation, protected areas, wave climat, harbor seiche.

- Kantarzhi I.G.* Impacts onto the Water Environment of the Sea Ports and Continental Shelf Structures Construction 17

The experience of development and environmental expert review of the sea hydro technical projects has been generalized. Construction and operation of the sea ports, as well as continental shelf structures may cause the significant impact onto sea water environment. The modern method of coastal processes modeling and the modern construction technologies can help in assessment of the environmental effects and to minimize these effects. The separation of the global project into stages may be applied if the environmental impact assessment is possible, only.

Key words: sea ports, continental shelf structures, construction and operation, design, environmental impact, impact assessment, expert review.

- Pelinovsky E.N., Shurgalina E.G.* Abnormal Intensification of a Wave near a Vertical Barrier 29

One of the possible mechanisms of freak-waves emergence near a vertical barrier, based on the dispersive focusing of unidirectional wave packets is analyzed. This mechanism is associated with the frequency dispersion of water waves and manifested in the interference of many spectral components, moving with different group velocities. Formation of a single freak wave in a random wind wave field is considered in the frame of linear theory. The characteristic lifetime of an abnormal wave in the framework of this mechanism for typical conditions is approximately two minutes, thus such a rapid effect is difficult to predict and prepare for. A rogue wave quickly changes its shape from a high ridge to a deep depression.

Key words: water waves, wind waves, freak waves, dispersive focusing.

- Kamynin E.Yu., Maximov V.V., Nudner I.S., Semenov K.K., Khakimzyanov G.S.* Study of Interaction of the Solitary Wave with a Partially Submerged Stationary Construction 39

The results of laboratory experiments and numerical modeling of the interaction of a solitary wave and a fixed partially submerged body of rectangular shape, located on a flat slope are presented. Carried out research allowed to determine the magnitude run-up on the body and the wave pressure on it, depending on the oncoming wave amplitude, the body length and its immersion, the angle of the slope.

Key words: solitary wave; partially submerged structure; run-up; pressure; laboratory experiment; numerical simulation; results.

- Didenkulova I.I., Sergeeva A.V., Pelinovsky E.N., Gurbatov S.N.* Statistical Estimates of Characteristics of Long Wave Run-up on a Beach 55

The run-up of irregular long sea waves on a beach of a constant slope is studied in the framework of nonlinear shallow water theory. It is shown that the problem nonlinearity does not influence on statistical moments of the velocity of the moving shoreline, but affects statistical moments of the displacement. In particular, for weak-amplitude waves it is demonstrated that the wave run-up process has a longer duration as compared to the duration of the wave run-down process, even if the incident wave field represents Gaussian stationary

process with a zero mean. The probability of wave breaking during the process of wave run-up is calculated and conditions of the model validity are discussed.

Key words: long waves, run-up, statistical moments, probability distributions.

Khabakhpasheva T.I., Korobkin A.A. Impulsive Interaction of Breaking Waves with Flexible Coastal Structures 64

The problem of impact of a water wave with flat front onto an elastic vertical plate which models the surface of a coastal structure is studied. The liquid is assumed weakly-compressible; the liquid flow is described within acoustic approximation. The deflection of the plate and its vibrations caused by impact are described by a linear theory of thin isotropic plates without accounting for shear stresses. The hydrodynamic and structural parts of the problem are coupled by both dynamic and kinematic conditions imposed on the wetted part of the structure. The problem is solved by the normal mode method. By using integral transforms the problem is reduced to a system of differential and integral equations which are numerically solved. Phenomena caused by the structural damping and liquid compressibility are investigated. It is shown that the structural damping affects the global evolution of the plate behavior; however, maximum deflection and maximum bending stress can be determined without account for structural damping. New combined model of violent wave impact is proposed. Within this model only the early stage of impact is described with taking the liquid compressibility into account, the later stage is simulated by using the model of incompressible liquid.

Key words: breaking wave, elastic plate, wave impact, compressible liquid, structural damping, bending stresses, combined model.

Leont'yev I.O. Shoreface profile dynamics in different time scales 78

Dynamics of the sea coast is characterized by both the short-term changes and the long-term trends manifested in the time scales of decades, centuries and milleniums. When modeling the short-term storm-induced deformations the process-based models turn out to be most successful as those simulate the suite of primary mechanisms responsible for sediment transport and bed deformations. Presented model CROSS-P is applicable to calculate the storm-induced deformations on sandy coasts of the seas, large lakes and water stores. To analyse the long-term coastal evolution the model SPELT is suggested determining the position and form of the profile depending on changes in sea level and imbalance of sediment budget.

Key words: coastal profile modeling, erosion, accumulation, storm-induced deformations, erosion, coastal evolution, sediment budget.

Soomere T., Zaitseva-Pärnaste I., Räämet A., Kurennoy D. Spatio-temporal variations of wave fields in the Gulf of Finland 90

We analyse the main properties of wave fields in the Gulf of Finland and their spatial and long-term variations based on visual wave observations performed since 1954 at two locations on the southern coast of the gulf and high-resolution simulations of wave fields for the entire Baltic Sea for 1970-2007. Shown is that both long-term average and maximum wave heights in the gulf are about a half for those in the Baltic Proper. The average wave heights have insignificantly changed in the gulf since the 1970s whereas the extreme wave heights have considerably increased in the northern and in the northeastern sections of the gulf. A probable reason for the changes is the enhancement of south-western winds over the last 40 years.

Key words: wind waves, wave measurements, wave modelling, wave climate, Baltic Sea, Gulf of Finland.

Gagoshidze Sh.N. To the Estimation of the Action of Longitudinal Waves on the Bank Slopes of the Open Sea and River Channels 102

One of the most characteristic properties of longitudinal waves is the growth of their height near the bank line. This property is especially observed in short longitudinal, the mathematical description of which in terms of mathematical approximation was for the first time given by Stokes. In the present paper, Stokes' solution generalized to the case of a stationary longitudinal flow is used to estimate the static stability and deformation of the sea shore slope or of the deep sea and river channel slopes. The stability of shore slopes of a shallow sea or trapezoidal or triangular channels, which have cross-section dimension commensurable with the longitudinal wave length is estimated on the basis of an approximate solution of three-dimensional wave equations by the Galerkin-Kantorovich method. This solution, while preserving the three-dimensional structure of waves over the bank slope, leads to the results which can be easily used in engineering design.

Key words: longitudinal waves, flow, channel depth, bank deformation.

УДК 551.465

© И.О. Леонтьев

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва
igor.leontiev@gmail.com

ДИНАМИКА ПРОФИЛЯ ПЕСЧАНОГО БЕРЕГА НА РАЗЛИЧНЫХ МАСШТАБАХ ВРЕМЕНИ

Динамика морского берега характеризуется как относительно кратковременными изменениями, так и долговременными тенденциями, проявляющимися на масштабах десятков, сотен и тысяч лет. При прогнозе кратковременных штормовых деформаций наиболее успешными оказываются так называемые «модели процессов», имитирующие последовательность первичных механизмов, ответственных за транспорт наносов и формирование рельефа дна. Представленная модель CROSS-P применима к расчетам штормовых деформаций на песчаных берегах морей, озер и водохранилищ. Для анализа долговременной эволюции берега предложена модель SPELT, определяющая положение и форму профиля в зависимости от изменений уровня моря и дисбаланса бюджета наносов.

Ключевые слова: моделирование профиля берега, эрозия, аккумуляция, штормовые деформации, эволюция берега, бюджет наносов.

Берег или береговая зона представляет собой пограничную область между сушей и морем, динамика которой определяется, прежде всего, волнением и связанной с ним системой прибрежных течений. Волны и течения, взаимодействуя с береговым склоном, вызывают перемещения наносов, которые, в свою очередь, приводят к переформированию прибрежного рельефа, т.е. к развитию морфодинамических процессов.

Из всей совокупности этих процессов выделяются относительно кратковременные, связанные с отдельными штормовыми и сезонными циклами, и долговременные, действующие на временных масштабах десятков, сотен и тысяч лет. В практическом плане с первыми из них ассоциируются задачи прогноза штормовых деформаций дна, а со вторыми – прогноз эволюции берега на период реализации тех или иных проектов его хозяйственного использования.

Главным инструментом прогнозирования профиля берега является математическое моделирование, опирающееся на принцип сохранения массы. В случае берега, сложенного песчаными наносами, уравнение сохранения массы связывает изменения глубин h на профиле с градиентами поперечных расходов наносов q_x :

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial q_x}{\partial x} - S + w, \quad (1)$$

где S – скорость поступления или выноса материала за счет дополнительных источников или стоков; $w = d\zeta/dt$ – скорость изменения уровня моря ζ ; t – время; ось x направлена вдоль нормали к берегу. Первые два слагаемых в правой части (1), по сути, характеризуют разность скоростей эрозии (Er) и аккумуляции (Ac) в данной точке дна, что позволяет придать уравнению (1) альтернативную форму:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = Er - Ac + w. \quad (2)$$

В такой трактовке изменения глубин при данном положении уровня представляются следствием дисбаланса двух противоположных процессов – эрозии, обуславливающей отрыв твердых частиц от дна за счет энергии волн и течений, и аккумуляции, связанной с осаждением наносов под влиянием силы тяжести.

Целью настоящей работы является характеристика подходов к моделированию берегового профиля на различных масштабах времени. Главное внимание концентрируется на двух моделях, разработанных автором. Одна из них (CROSS-P) предназначена для расчета изменений рельефа в масштабе отдельных штормов, а другая (SPELT) служит для описания долговременной эволюции профиля.

Штормовые деформации

Структура «модели процессов». Моделирование штормовых деформаций основывается на так называемых «моделях процессов» (process-based models), которые имитируют последовательность первичных механизмов, вызывающих перемещения наносов и изменения морфологии дна. Подобная модель включает ряд связанных модулей, предназначенных для расчета различных компонентов морфодинамического процесса, – волнения, транспорта наносов и изменений глубин. Входными параметрами являются: 1) исходный профиль берегового склона; 2) свойства песчаных наносов; 3) параметры волн, ветра и уровня моря; 4) продолжительность действия волнения.

На каждом временном шаге вначале вычисляются распределения высот волн и связанных с ними характеристик по протяжению профиля, затем на их основе рассчитываются расходы наносов. Наконец, путем численного интегрирования уравнения сохранения массы (1) определяются деформации дна и новый профиль глубин.

В модели автора CROSS-P [1–3] высоты волн H определяются на основе аналитического решения уравнения баланса энергии с учетом закона рефракции, а волновой уровень (wave setup) рассчитывается из уравнения баланса импульса.

При интегрировании уравнения (1) используется двухтактная численная схема Лакса-Вендроффа. Морская граница расчетного створа выбирается за пределами активной части профиля, т.е. там, где глубина изменяется незначительно ($h_0 \approx \text{const}$). Значение h_0 зависит от высоты волн на входе H_0 и практически должно удовлетворять условию $h_0 > 5H_0$. В модели имеется алгоритм, имитирующий обвал или оползень в случае, если локальный уклон дна превысит уклон естественного откоса $\text{tg}\Phi$ (для песка около 0.6). Возможна имитация препятствия в виде подводного волнолома или стенки на пляже.

Модуль транспорта наносов. Наиболее контрастные различия существующих моделей штормовых деформаций [4–7] связаны с применением разных способов расчета транспорта наносов.

В модели CROSS-P [1–3] формулы транспорта наносов основываются на энергетической концепции [8], связывающей расход наносов со скоростью диссипации энергии в придонном слое. Выделяются расходы q_x , создаваемые волнами и течениями в зонах трансформации и прибоя и q_{R_x} , обусловленные потоком заплеска.

Расход $q_x = q_x^0 - 2\beta|q_x^0|$, где $\beta = -\partial h / \partial x$ – локальный уклон дна, а величина q_x^0 относится к горизонтальному дну:

$$q_x^0 = [g(\rho_s - \rho)(1 - \sigma)]^{-1} \left[\frac{9\pi}{16} \frac{\varepsilon_b}{\text{tg}\Phi} F \frac{u_{2m}}{u_m} \cos\Theta + \frac{\varepsilon_s}{w_s} (4F + B)(U_w + U_c) + q_{BS} \cos\Theta \right]. \quad (3)$$

Здесь q_x^0 выражено в $\text{м}^3 \text{м}^{-1} \text{с}^{-1}$; g – ускорение силы тяжести; ρ_s – плотность наносов; ρ – плотность воды; σ – пористость грунта; отношение u_{2m}/u_m характеризует асимметрию волновых скоростей (u_m и u_{2m} – первая и вторая гармоники колебаний); w_s – гидравлическая крупность наносов; F и B – скорости диссипации энергии вследствие донного трения и турбулентности, проникающей к дну при обрушении волн; ε_b и ε_s – коэффициенты эффективности транспорта влекомых и взвешенных наносов (около 0.1 и 0,02); U_w и U_c – нормальные составляющие переносных скоростей у дна, обусловленные волнением и течениями соответственно; Θ – угол между лучом волны и нормалью к берегу. Величина q_{BS} представляет дополнительный расход в зоне обрушения за счет выброса взвеси в верхнюю часть водной толщи. Он направлен в сторону берега и параметризуется в форме:

$$q_{BS} = c_1 \varphi(x) \frac{\varepsilon_s}{w_s} D u_m, \quad \varphi(x) = \left(\frac{x - x_B}{l_B} \right)^{1/2}, \quad l_B = c_2 d_B.$$

Здесь функция $\varphi(x)$ используется для сглаживания изменений вблизи точки x_B , маркирующей глубину обрушения d_B , коэффициенты $c_1 = 0.03$ и $c_2 = 8$, а D – скорость диссипации энергии при обрушении волн:

$$D = 2B_D \hat{P} \frac{E}{T}, \quad \hat{P} = \left(\frac{H}{\hat{\gamma}h} \right)^4,$$

где \hat{P} – доля обрушающихся волн в спектре, E – энергия, T – период волн, коэффициенты B_D и $\hat{\gamma}$ порядка единицы и зависят от глубины, уклона дна и крутизны волн [3].

Величины u_{2m}/u_m , F и B определяются локальными параметрами волн, глубинами и свойствами дна:

$$\frac{u_{2m}}{u_m} = c_u U r, \quad F = \frac{2}{3\pi} f_w \rho u_m^3, \quad B = \xi D \exp[-3(1/\hat{P} - 1)],$$

где коэффициент $c_u = 0.16$; $U r = (3/8)(kH)/(kh)^3$ – параметр Урселла; $k = 2\pi/L$ – волновое число; L – длина волн; f_w – коэффициент трения, зависящий от размера твердых частиц и шероховатости дна; $\xi = \bar{s}/\sqrt{H_0/L_0}$ – параметр Иррибаррена-Баттеса; \bar{s} – средний уклон дна в прибойной зоне; $L_0 = (g/2\pi)T^2$ – длина волн на глубокой воде.

Скорость U_w отражает эффекты переноса в направлении распространения волн в донном пограничном слое (steady streaming) и противотечения (undertow), генерируемого в прибойной зоне:

$$U_w = \phi_d \frac{u_m^2}{C} \cos \Theta, \quad \phi_d = \frac{D^* - D}{D^*}, \quad D^* = \frac{EC_g}{X},$$

где C – фазовая скорость волн, а величина D^* представляет средний градиент потока энергии на отрезке X между данной точкой и берегом, C_g – групповая скорость волн. При отсутствии диссипации энергии ($D = 0$, $\phi_d = 1$) скорость положительна, т.е. направлена к берегу.

Скорость U_c может быть обусловлена, например, оттоком воды у дна при ветровом нагоне [1]:

$$U_c = -0.0007(W^2 / \sqrt{gh}) \cos \Theta_w,$$

где W – скорость ветра; Θ_w – его угол относительно береговой нормали.

Характер перемещения наносов зависит от параметра $S_D = H_0 / (w_s T)$. При $S_D < 2$, когда волнение относительно слабое или частицы на дне сравнительно крупные, транспорт наносов практически полностью контролируется асимметрией волновых скоростей, вызывающей перенос в сторону берега [4].

Что касается расхода наносов \hat{q}_{Rx} , то он достигает максимума на урезе воды и уменьшается как к вершине заплеска, так и к его нижнему краю. Максимальное значение \hat{q}_{Rx} , выраженное в $\text{м}^3 \text{м}^{-1} \text{с}^{-1}$, представляется в форме:

$$\hat{q}_{Rx} = [g(\rho_s - \rho)(1 - \sigma)]^{-1} K_R \rho u_R^3 (\beta_{eq} - \bar{\beta}). \quad (4)$$

Здесь K_R – масштабный коэффициент, зависящий как от параметров волн, так и от размера частиц наносов d_s ; $u_R = \sqrt{2gR}$ – масштаб скорости заплеска; R – его высота; $\bar{\beta}$ – фактический средний уклон пляжа; β_{eq} – равновесный уклон.

$$K_R = 0.5 \cdot 10^{-7} \frac{T \sqrt{gH_0}}{d_s}, \quad R = \bar{\beta} \sqrt{H_0 L_0}, \quad \beta_{eq} = 0.1 \sqrt{\frac{w_s T}{H_0}}.$$

Согласно (4), если $\bar{\beta} > \beta_{eq}$, то расход $\hat{q}_{Rx} < 0$, т.е. направлен от берега в море.

Примеры расчетов по модели CROSS-P. На рис. 1 даны примеры сравнения модельных расчетов с опубликованными данными экспериментов [9–11], условия которых (средний размер песка d_s , средние высоты H и периоды волн T , а также продолжительность волнения t_w) отражены на графиках. Рис. 1, а) демонстрирует эффект добавочного расхода взвеси в зоне обрушения q_{BS} , включение которого позволяет более точно предсказать положение подводного вала. На рис. 1, б) показан результат переработки берегового склона, оканчивающегося клифом. Рис. 1, в) отражает развитие профиля, на котором песок перемещается преимущественно в сторону берега ($S_D < 2$), где образуется береговой вал или берма.

Рис. 2 отражает моделирование размыва искусственного подводного вала, появившегося в результате отсыпки песка, например, для дополнительного питания пляжа. Как видно, относительно мелкий песок перемещается в основном вниз по склону и аккумулируется в виде подводной террасы, а крупный песок из вала, наоборот, транспортируется к пляжу и способствует его нарастанию.

На рис. 3 представлены результаты, отражающие более длительное развитие профиля. Расчеты выполнялись для каждой ситуации, характеризующей ветро-волновой режим (таблица), достаточно типичный для водохранилищ (W – скорость ветра).

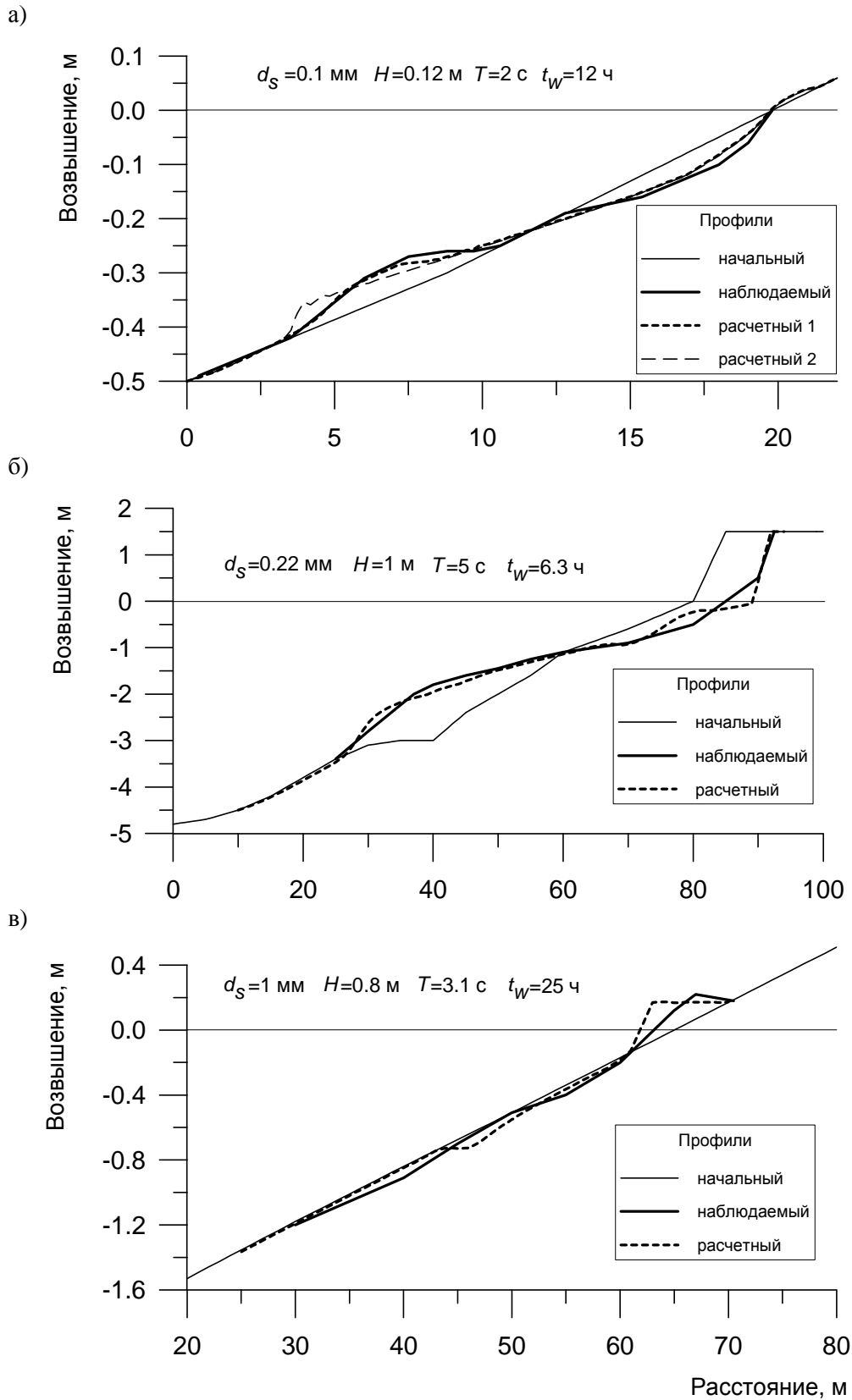


Рис. 1. Сравнение модельных расчетов с экспериментальными данными: а) – данные [9]; расчетные профили 1 и 2 получены соответственно с учетом и без учета добавочного расхода взвеси q_{BS} в зоне обрушения; б) – данные [10]; в) – данные [11].

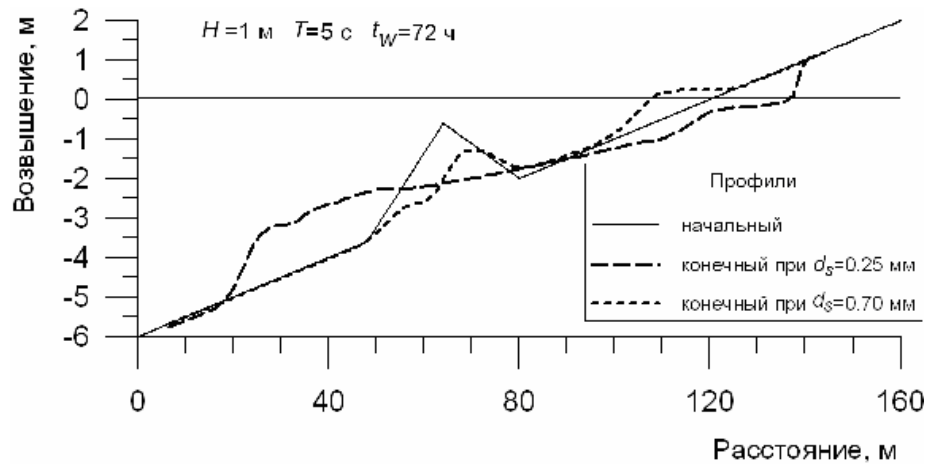


Рис. 2. Деформации профиля с искусственным подводным валом при различной крупности материала отсыпки.

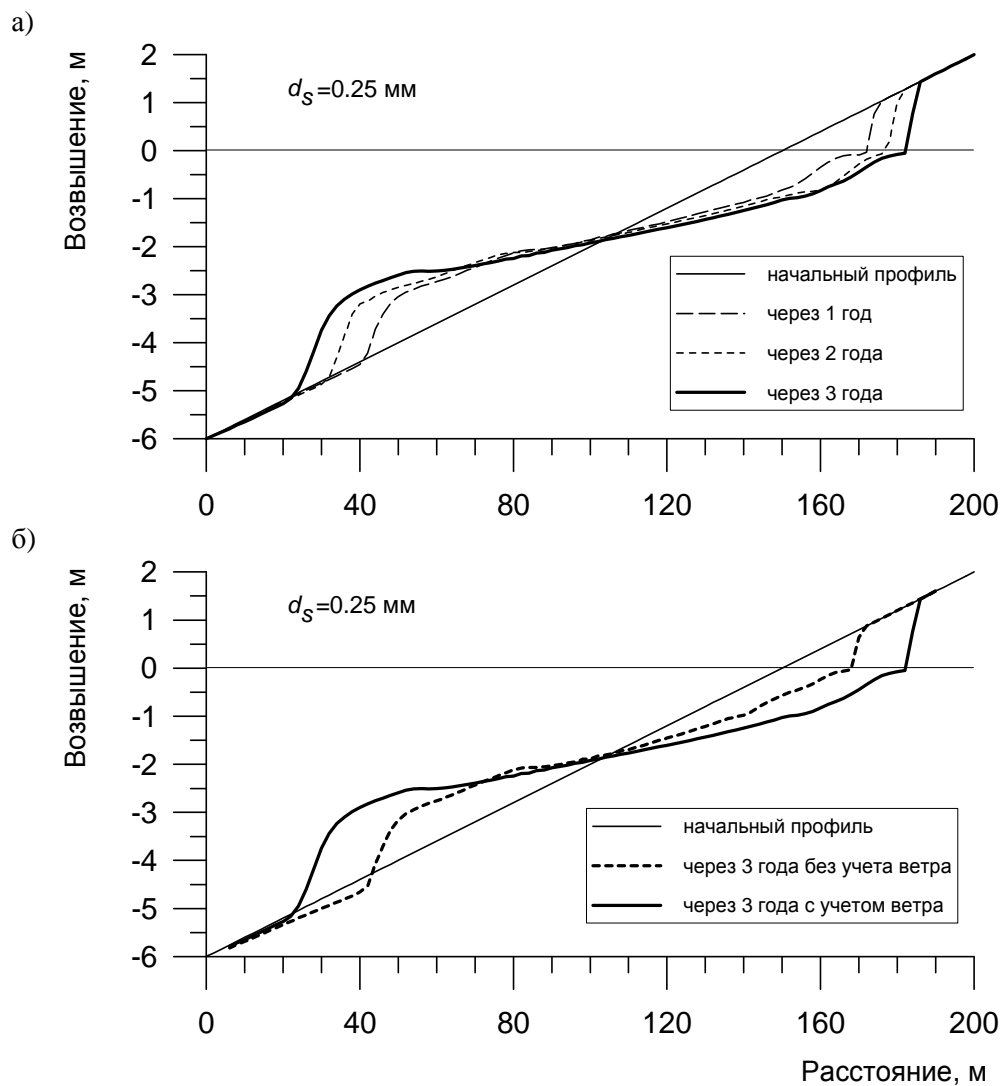


Рис. 3. Деформации берегов водохранилищ в первые годы после наполнения: а) – изменения профиля с интервалом в 1 год; б) – прогноз изменений профиля без учета и с учетом режима ветра.

Ветро-волновой режим, типичный для некоторых водохранилищ

$W, \text{ м с}^{-1}$	$H, \text{ м}$	$T, \text{ с}$	$t_w, \text{ ч}$
8	0.4	3.0	800
12	0.6	3.4	400
16	0.8	3.8	150
18	1.0	4.0	20

Из рис. 3, а) следует, что наибольшие деформации происходят в течение первого года после наполнения водохранилища, и по мере расширения прибрежной отмели размыв замедляется. Отступление берега за первый год достигает 20 м, а затем скорость рецессии уменьшается до 5–6 м в год. Эти значения достаточно близки к наблюдаемым [3].

Рис. 3, б) указывает на необходимость учета влияния ветра при прогнозировании деформаций профиля. Ветер с моря создает стоковое течение у дна, которое выносит взвешенный материал и тем самым существенно ускоряет размыв.

Эволюция профиля берега на больших масштабах времени

Сохранение массы. При моделировании долговременной эволюции (десятки, сотни и тысячи лет) баланс наносов рассматривается, как правило, лишь в отношении достаточно крупных элементов береговой зоны [12–16], что имеет следствием меньшую детальность в сравнении с «локальным» моделированием кратковременных деформаций. Альтернативой является излагаемая ниже модель SPELT, принимающая в расчет как интегральный, так и локальный баланс наносов, что позволяет получить дополнительную информацию об изменениях профиля в ходе эволюции.

Основой модели служит уравнение сохранения массы в форме (2), где масштаб времени t измеряется, по меньшей мере, годами. Интегрирование скоростей эрозии и аккумуляции Er и Ac по длине активного профиля l_* от бровки берега ($x = 0, h = 0$) до морской границы активного профиля ($x = x_*, h = h_*$) приводит к годовым объемам эрозии Q_E и аккумуляции Q_A . Объем Q_A зависит от Q_E , но может включать и дополнительные объемы B за счет внешних источников или стоков:

$$Q_A = Q_E + B. \quad (5)$$

Положительные или отрицательные B означают преобладание аккумуляции или размыва.

Скорости эрозии и аккумуляции. Согласно классическим представлениям [8], скорость транспорта наносов пропорциональна градиенту потока энергии, создаваемого течением или волнами. Учитывая требования размерности и принимая во внимание уменьшение эрозии с ростом глубины, приходим к следующему выражению Er :

$$Er = (m+1) \frac{Q_E}{h_*} \left(1 - \frac{h}{h_*}\right)^m \frac{\partial h}{\partial x}, \quad Q_E = \int_0^{x_*} Er dx = \frac{c_e}{m+1} \frac{F_\Sigma}{\rho g l_*}, \quad (6)$$

где $m > 1$; $c_e = 0.1$; F_Σ – годовой поток энергии на единицу длины берега ($\text{Дж м}^{-1}\text{год}^{-1}$).

Скорость аккумуляции Ac пропорциональна произведению концентрации твердых частиц C на скорость их осаждения w_s , причем C уменьшается с удалением от берега. Используя условие баланса наносов (5), можно получить соотношение:

$$Ac = (n+1) \frac{Q_E + B}{l_*} \left(1 - \frac{x}{l_*}\right)^n. \quad (7)$$

Береговой профиль находится в состоянии равновесия, если в каждой его точке скорости эрозии и аккумуляции совпадают. Приравнявая Er и Ac в (6) и (7) и полагая $B = 0$, приходим к уравнению, из которого следует формула профиля равновесия:

$$\frac{h}{h_*} = 1 - \left(1 - \frac{x}{l_*}\right)^p, \quad p = \frac{n+1}{m+1}. \quad (8)$$

Профили песчаных берегов обычно вогнуты вверх, поэтому $p > 1$ и $n > m$. Зависимость (8) удовлетворительно воспроизводит усредненные очертания наблюдаемых профилей при значениях $m = 2, n = 3.5, p = 1.5$ (рис. 4).

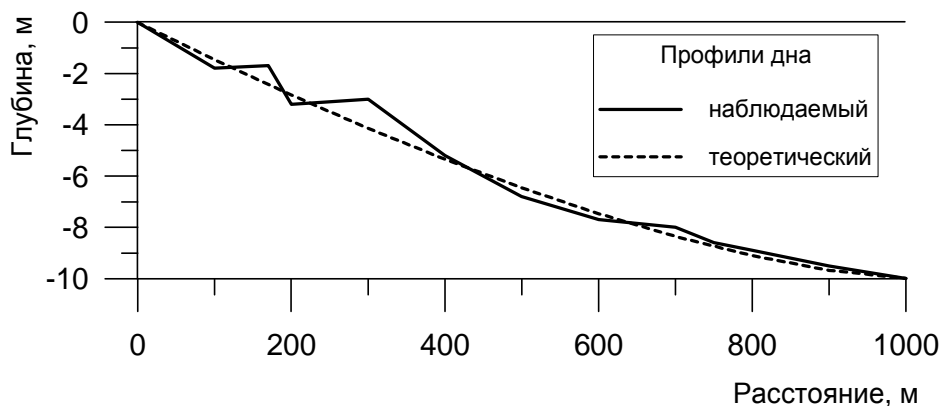


Рис. 4. Сравнение берегового профиля Анапской пересыпи (Черное море, п. Витязево) с теоретическим профилем (8).

Влияние изменений уровня моря и дисбаланса бюджета наносов. При повышении уровня моря весь активный профиль без изменения формы перемещается в новое положение. Профиль песчаного тела и профиль субстрата, на котором оно располагается, характеризуются уклонами $\beta = h_*/l_*$ и β_s , которые могут отличаться друг от друга. Если β и β_s близки друг к другу, то профиль смещается по горизонтали в соответствии с правилом Бруна [17]:

$$\frac{\partial x_0}{\partial t} = -w/\beta, \quad (9)$$

где $\partial x_0/\partial t$ — скорость смещения бровки берега. При сравнительно малых уклонах субстрата, $\beta_s < \beta$, песчаное тело перемещается вслед за уровнем в соответствии с альтернативным правилом, $\partial x_0/\partial t = -w/\beta_s$. Наконец, если уклон поверхности субстрата больше уклона профиля равновесия, $\beta_s > \beta$, имеем абразионный берег с клифом, отступающий со скоростью $\partial x_0/\partial t = -wl_*/(h_* + z_c)$, где z_c — высота клифа.

При понижении уровня моря перемещение профиля во всех рассмотренных случаях контролируется правилом (9).

Другим важнейшим фактором эволюции является дисбаланс бюджета наносов ($B \neq 0$), вызывающий смещение берега. В соответствии с (2), (6) и (7), при $B < 0$ (дефицит материала) $\partial x_0/\partial t < 0$ (берег отступает), а при $B > 0$ (избыток наносов) $\partial x_0/\partial t > 0$ (берег выдвигается). Поскольку внешняя граница профиля остается на месте ($\partial x_*/\partial t = 0$), то при отступании берега уклоны дна уменьшаются, а при выдвигении — увеличиваются. В последнем случае уклон ограничен предельным значением β_m , при котором профиль выдвигается без изменения формы.

Процедура расчетов. Перед проведением расчетов задается начальный профиль берега, активная часть которого аппроксимируется уравнением профиля равновесия (8). Входными параметрами являются годовой объем эрозии Q_E (определяемый из (6) на основе величины годового потока энергии), бюджет наносов B , скорость изменений уровня w и период эволюции. Уравнение (2) численно интегрируется по времени с шагом Δt , включающим две итерации. На первой из них вычисляются локальные значения Er и Ac , и в результате определяется новый профиль. На второй итерации профиль транслируется в новое положение в соответствии с изменением уровня.

В процессе эволюции длина активного профиля l_* может меняться, что определяет и изменения объема эрозии Q_E , пропорционального градиенту F_Σ / l_* . Поэтому на каждом временном шаге значение Q_E корректируется с помощью соотношения $Q_E = (l_*^0 / l_*) Q_E^0$, где верхний индекс «0» относится к первоначальным значениям.

Верификация модели. Один из способов проверки модели может заключаться в реконструкции развития какого-либо берега при наличии данных о его положении в предшествующие эпохи. Подобная информация имеется, например, для побережий Центральной Голландии [13] (рис. 5) и Абхазии в районе Сухуми [18] (рис. 6).

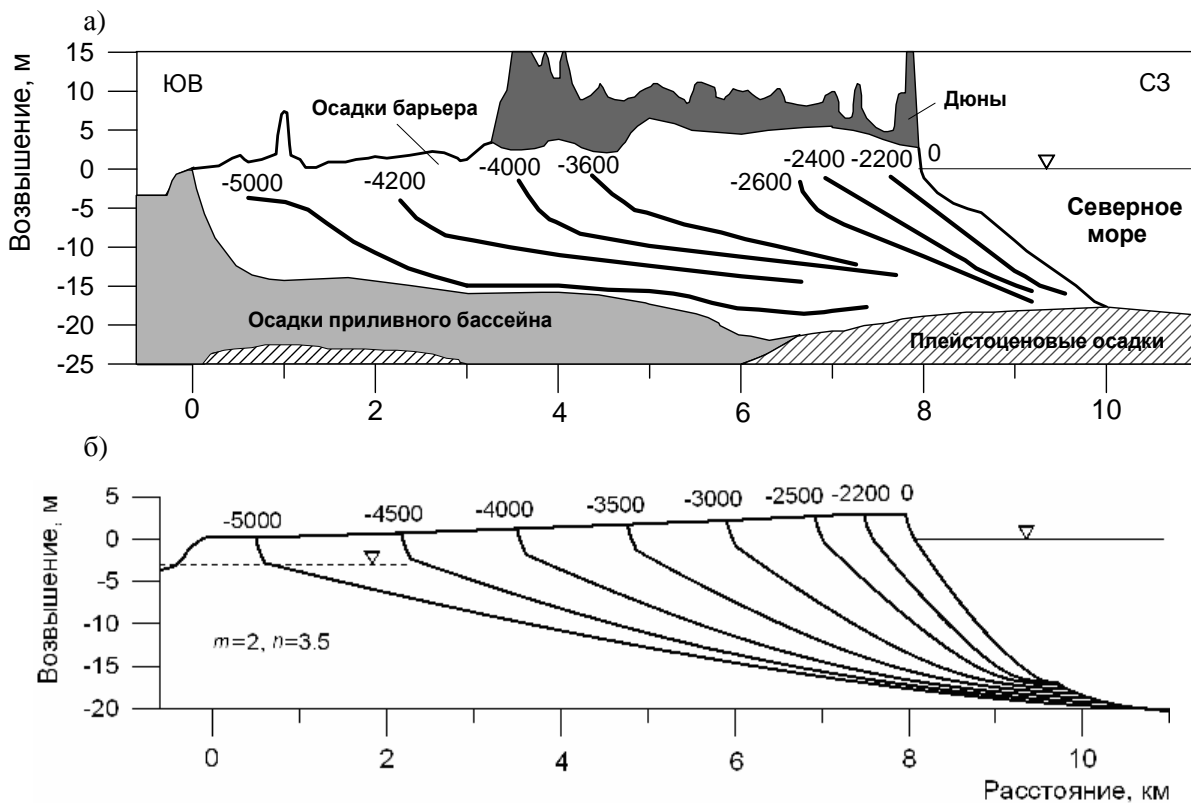


Рис. 5. Развитие берега Центральной Голландии в период позднего голоцена: а) – по данным бурения и радиоуглеродного анализа [13]; б) – по результатам моделирования.

Район Центральной Голландии. По окончании послеледниковой трансгрессии береговой барьер, сформировавшийся около 5000 лет назад, выдвигался в море вследствие избыточного питания наносами (рис. 5, а). Одновременно с проградацией барьера развивался дюнный пояс. Затем приток материала резко уменьшился. Скорость повышения уровня в период от -5000 до -2200 лет составляла $w = 0.001$ м год⁻¹, а затем уровень оставался почти постоянным [13].

Результаты моделирования представлены на рис. 5, б), где показаны последовательные положения вычисленных береговых профилей с интервалом 500 лет. Годовой объем аккумуляции для интервала времени от -5000 до -2200 лет оценивается как $B = 35 \text{ м}^3 \text{ м}^{-1} \text{ год}^{-1}$, а для периода от -2200 до 0 как $B = 3 \text{ м}^3 \text{ м}^{-1} \text{ год}^{-1}$. Последняя величина близка к известным оценкам современного значения B [13, 19].

Район Сухумского побережья. В период от 6500 до 2500 лет назад берег в районе Сухумского мыса выдвигался в море вследствие аккумуляции материала, поставляемого юго-восточным вдольбереговым потоком. Уровень моря за это время повысился почти на 10 м, а затем колебался около современной отметки [18]. Описанная эволюция маркируется «лестницей» реликтов берегового барьера (рис. 6, а).

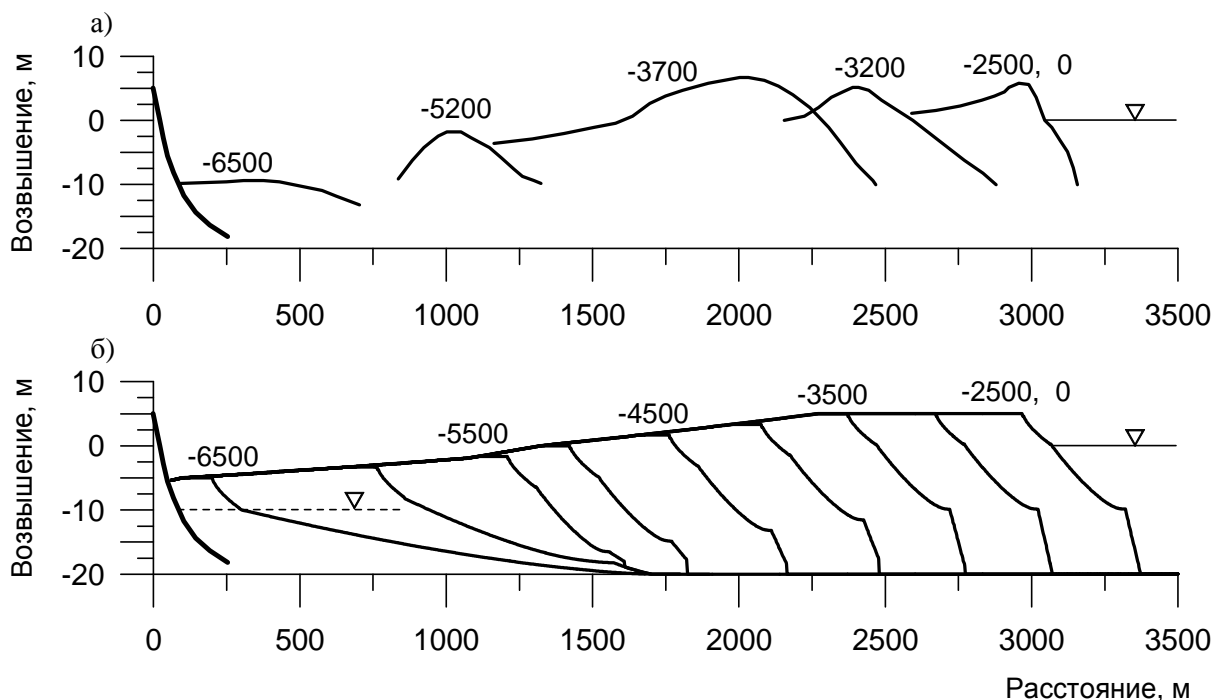


Рис. 6. Развитие берега в районе Сухумского мыса в позднем голоцене:

- а) – реликты берегового барьера по данным бурения и радиоуглеродного анализа [18];
 б) – динамика профиля по результатам моделирования.

Результаты моделирования представлены на рис. 6, б). В период от -6500 до -5000 лет объем аккумуляции составлял $B = 11 \text{ м}^3 \text{ м}^{-1} \text{ год}^{-1}$, а в последующий период до -2500 лет он должен был увеличиться до $15 \text{ м}^3 \text{ м}^{-1} \text{ год}^{-1}$. Возможно, вследствие повышения уровня усилился размыв, и увеличился поток наносов. Примерно 5000 лет назад профиль достиг максимального уклона и затем выдвигался, сохраняя свою форму.

В целом модель удовлетворительно воспроизводит развитие рассмотренных побережий в последние тысячелетия. В результате роста уклонов профилей в ходе эволюции объемы эрозии Q_E значительно увеличились и в настоящее время, по расчетам, в 4–5 раз превышают первоначальные значения.

Морфодинамические процессы, определяющие поведение берега, включают как относительно кратковременные, так и долговременные составляющие. Кратковременные деформации рельефа представляют некий высокочастотный фон, на котором проявляются те или иные тенденции развития, заметные только на достаточно длительных пе-

риодах времени. В настоящей работе кратко обрисованы подходы к моделированию динамики профиля на различных временных масштабах – от отдельных штормовых событий до эпох эволюции, измеряемых тысячелетиями.

При рассмотрении сравнительно кратковременных масштабов развития наиболее эффективным является использование «моделей процессов», включающих взаимосвязанные модули волнения, транспорта наносов и деформаций дна. Предложенная модель CROSS-P основывается на достаточно ясных физических предпосылках и использует сравнительно простой математический аппарат. Она способна воспроизводить поведение береговых профилей в широком диапазоне динамических условий береговой зоны морей, крупных озер и водохранилищ. Применяемая вычислительная схема обеспечивает устойчивость результатов при сложном рельефе дна и резко меняющейся гидродинамической обстановке.

При анализе долговременной эволюции берега геометрия активного профиля обычно принимается неизменной. Представленная модель SPELT сочетает в себе черты, свойственные как «интегральным», так и «локальным» моделям, что позволяет описать не только перемещения профиля, но и изменения его формы. Учитывается несколько типов реакции берега на изменения уровня моря. Последние в сочетании с дефицитом или профицитом бюджета наносов создают множество вариантов поведения берегового профиля. Как показывают результаты расчетов, модель удовлетворительно воспроизводит процесс проградации береговых барьеров, типичный для периода позднего голоцена (последние 5–6 тысяч лет). Это позволяет надеяться, что модель окажется полезной и для прогнозирования будущих изменений.

Хотя береговые процессы в природе, в общем, трехмерны, профильные модели, тем не менее, оказываются способными воспроизвести их главные черты. Об этом, в частности, свидетельствуют исследования Ван Рейна и др. [20], в которых штормовые изменения морфологии дна, наблюдавшиеся у голландского побережья, сравнивались с модельными расчетами.

Эффект вдольберегового транспорта наносов может сказываться на динамике профиля только в условиях значительных градиентов продольных расходов, например, в окрестностях сооружений. Возникающий при этом дисбаланс бюджета наносов, в соответствии с нашими выводами, будет изменять уклон профиля либо в сторону роста (при разгрузке вдольберегового потока), либо в сторону уменьшения (при насыщении потока).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 08-05-00860 и № 09-05-00034-а).

The support of the European Commission through FP7.2009-1, Contract 244104 – THESEUS («Innovative technologies for safer European coasts in a changing climate»), is gratefully acknowledged.

Литература

1. Леонтьев И.О. Прибрежная динамика: волны, течения, потоки наносов. М.: ГЕОС, 2001. 272 с.
2. Leont'yev I.O. Modeling the morphological response in a coastal zone for different temporal scales // Advances in Coastal Modeling / Ed. Lakhan V.C. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Science Publishers. 2003. P.299–335.
3. Хабидов А.Ш., Леонтьев И.О., Марусин К.В., Шлычков В.А., Савкин В.М., Кусковский В.С. Управление состоянием берегов водохранилищ. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 239 с.
4. Larson M., Kraus N.C. SBEACH: numerical model for simulating storm-induced beach change. Tech. Rep. CERC-89-9. 1989. US Army Eng. Waterw. Exp. Station. Coastal Eng. Res. Center.
5. Nairn R.B., Southgate H.N. Deterministic profile modeling of nearshore processes: Part 2. Sediment transport and beach profile development // Coastal Eng. 1993. V.19. P.57–93.
6. Sierra J.P., Azuz I., Rivero F.J., Sanchez-Arsilla A., Rodriguez A. Morphodynamic modeling in the near-shore area // Proc. of COASTAL 97 (Ed. Acinas J.R., Brebbia C.A.). La Coruna, Spain. Computational Mechanic Publ. 1997. P.433–442.
7. O'Connor B.A., Nicholson J. Modelling short-term beach profile changes // 5th Int. Conf. on Coastal and Port Eng. in developing countries. Cape Town. 1999. P.277–287.

8. *Bagnold R.A.* Mechanics of marine sedimentation // *The Sea*. V.3. N.Y.: J. Wiley, 1963. P.507–528.
9. *Roelvink J.A., Stive M.J.F.* Bar-generating cross-shore flow mechanisms on a beach // *J. of Geophys. Res.* 1989. V.94. No.C4. P.4785–4800.
10. *Brøker H.I., Roelvink J.A., Southgate H., Pechon P., Nicholson J., Hamm L.* Intercomparison of coastal profile models // 23rd Coastal Eng. Conf. ASCE. 1992. P.2108–2121.
11. *Shimizu T., Kawata Y.* Simultaneous observations on irregular waves, currents, suspended sediment concentrations and beach profile changes in large wave flume // *Int. Conf. "Coastal Dynamics'97*. ASCE. 1997. P.486–495.
12. *Cowell P.J., Roy P.S., Jones R.A.* Simulation of large-scale coastal change using a morphological behaviour model // *Marine Geol.* 1995. V.126. P.45–61.
13. *Stive M.J.F., De Vriend H.J.* Modelling shoreface profile evolution // *Marine Geol.* 1995. V.126. P.235–248.
14. *Stolper D., List J.H., Thielier E.R.* Simulating the evolution of coastal morphology and stratigraphy with a new morphological-behaviour model (GEOMBEST) // *Marine Geol.* 2005. V.218. P.17–36.
15. *Леонтьев И.О.* Прогнозирование эволюции берегов на основе математического моделирования // *Океанология*. 2006. Т.46. № 4. С.603–611.
16. *Леонтьев И.О.* Бюджет наносов и прогноз развития берега // *Океанология*. 2008. Т.48. № 3. С.467–476.
17. *Bruun P.* The Bruun rule of erosion by sea-level rise: a discussion on large-scale two- and three-dimensional usages // *J. of Coastal Res.* 1988. V.4, No.4. P.627–648.
18. *Поротов А.В., Леонтьев И.О.* Развитие береговой зоны Сухумского побережья в позднем голоцене // *Океанология*. 2005. Т.45. № 2. С.295–303.
19. *Van Rijn L.C.* Sediment transport and budget of the central coastal zone of Holland // *Coastal Eng.* 1997. V.32. P.61–90.
20. *Van Rijn L.C., Walstra D.J.R., Grasmeyer B., Sutherland J., Pan S., Sierra J.P.* The predictability of cross-shore bed evolution of sandy beaches at the time scale of storms and seasons using process-based profile models // *Coastal Eng.* 2003. V.47. P.295–327.

Статья поступила в редакцию 13.04.2010 г.

